

## **Klassische Mechanismen-Synthese dynamisch assoziativ durch Pro/Engineer Wildfire**

**Dipl.- Ing. Timo Scherer; Prof. Dr.- Ing. Rainer Lohe**

Universität Siegen, Department Maschinenbau, Institut für Konstruktion

### **Kurzfassung**

Im Optimierungsprozess einer Konstruktion und zur Variantenbildung ist die Nutzung der Parametrik für den Konstrukteur zum Standard und unverzichtbar geworden. Auslegungen und speziell die Festlegung von Abmessungen werden im Maschinenbau über die Umstellung von Analysegleichungen oder durch iterative Analysen, wie bspw. die numerische Optimierung durchgeführt. Die Mechanismenlehre ist eines der wenigen Fachgebiete, in denen die Auslegung, also die Synthese nicht auf den Analyseverfahren beruht. Speziell für die Auslegung wurden die klassischen Syntheseverfahren entwickelt. Im Zeitalter vollparametrischer CAD-Systeme erscheinen diese Verfahren in einem neuen Licht. Einfache getriebetechnische Kenntnisse sind für die Lösung von Führungs- und Bewegungsaufgaben zwar erforderlich, sind in Lehrbüchern, VDI-Richtlinien, TGL-Blättern usw. aber auch gut nachzulesen.

Anhand einiger Beispiele soll hier gezeigt werden, wie diese klassischen grafischen Konstruktionsvorschriften auf einfache Weise in das CAD-System Pro/Engineer Wildfire integriert werden können. Der Konstrukteur kann seine Auslegung dynamisch interaktiv variieren und sogar verschiedene Gütwerte seines Getriebes dabei beobachten. Durch diese assoziative Komponente wird eine mehrparametrische Optimierung realisierbar.

Im Vortrag wird an Beispielen gezeigt, dass ein CAD-Konstrukteur diesem Vorschlag folgen und das Verfahren anwenden kann, um einen ersten Entwurf vorzulegen. Eine weitergehende Verwendung von Zusatzmodulen, wie zum Beispiel Pro/Mechanica oder Pro/Mechanism, würde erst bei zusätzlichen Untersuchungen der Konstruktion erforderlich.

### **1 Einleitung**

Pro/Engineer bietet dem Konstrukteur vielfältige Möglichkeiten zur Konstruktion und Analyse von Bauteilen und Baugruppen.

Im vollparametrischen CAD-System stehen dabei einige Funktionen zur Verfügung, die für den Konstrukteur in ihrer schlichten Verwendung selbstverständlich sind, für den kinematisch versierten Entwickler aber herausfordernd und segensreich zugleich sind.

Die Parametrik seines CAD-Systems nutzt der Konstrukteur in der Regel „nur“, um Konstruktionselemente relativ zu Körperkanten und weiteren Konstruktionselementen zu positionieren. Darüber hinaus lässt sich die Parametrik aber auch gut nutzen, um zeitgleich bestimmte Gütekriterien einer Konstruktion bei Veränderung eines oder mehrerer Werte zu beobachten.



**Bild 1: Scheibenwischer eines Mercedes CLS (Werkbild AMG)**

Die Getriebesynthese gehört auch heute noch zu den täglichen Aufgaben eines Konstrukteurs. Deren klassischen grafischen Verfahren lassen sich gut aus Konstruktionselementen in der Skizzierungsumgebung von Pro/Engineer aufbauen. Zur Lösung von Bewegungs- und Übertragungsaufgaben kann sich der Konstrukteur so sein ihm vertrautes CAD-System zu Nutze machen und auf Spezialsoftware verzichten.

Über den parametrischen Aufbau von Konstruktionselementen zum Zwecke der Getriebesynthese ist bis heute wenig veröffentlicht. In diesem Beitrag



bezeichnet. Deren Bemaßungswerte sind veränderlich und passen sich manuell hinzugefügten Maßen bzw. Bedingungen an. Weiterhin können sie in „starke Maße“ umgewandelt werden oder aufgrund einer manuell hinzugefügten gleichwertigen Bedingung wieder verschwinden. Manuell eingefügte Maße (starke Maße) können von Pro/E nicht automatisch gelöscht werden, können aber zum Beispiel durch dynamisches „Ziehen“ an dem Element geändert werden. Ist die Möglichkeit der Änderung von Maßen durch dynamisches Ziehen nicht erwünscht, so muss das Maß aktiv „gesperrt“ werden. [2], [3]

Pro/Engineer erlaubt durch die zuvor beschriebene Methode der Bedingungssteuerung das gleichzeitige dynamische Ändern mehrerer Elemente. Hierzu sind selbsterstellte „Anfasspunkte“ geeignet.

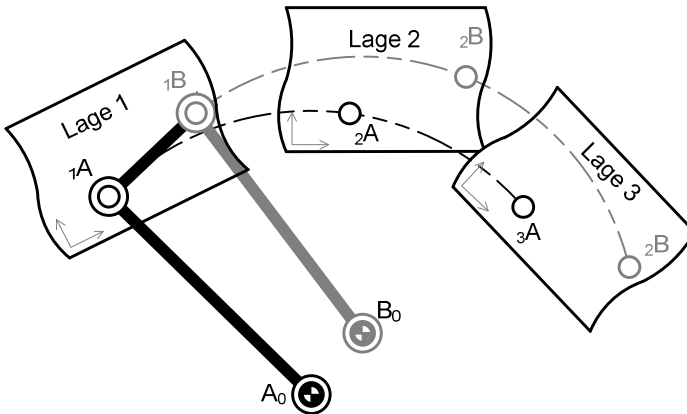
Für eine geeignete Parametrisierung kann alternativ auch eine Tabelle genutzt werden. Auf diese Tabelle kann der Konstrukteur in Pro/Engineer sowohl in der 2D-Skizze, als auch im 3D-Teilemodus zugreifen.

## 2 Getriebesynthese für drei Lagen einer Koppellebene

Die Aufgabe besteht darin, den Körper (**Bild 3**) aus der Lage 1 über die Lage 2 in die Lage 3 zu überführen. Es soll dafür ein viergliedriger Mechanismus (Getriebe) konstruiert werden. Dieser Mechanismus entsteht dadurch, dass der Körper mit Hilfe zweier Lenker mit dem Gestell verbunden wird. Legt man zum Beispiel einen Gelenkmittelpunkt  ${}_1A$  willkürlich fest, dann folgen daraus zwangsläufig die beiden anderen Lagen  ${}_2A$  und  ${}_3A$  und der Gestellpunkt  $A_0$ . Gleiches gilt für den Lenker  $B_0B$ , grau in **Bild 3**.

Durch die drei Lagen der Punkte A und B wird je ein Kreisbogen gelegt, deren Mittelpunkte stellen die zugehörigen Gestellpunkte  $A_0$  und  $B_0$  dar. Mit dieser freien Wahl der Gelenkpunkte  ${}_1A$  und  ${}_1B$  ist es möglich, auf einfache und schnelle Weise mehrere mögliche Lenker zu ermitteln. Ein mögliches Getriebe ist somit durch die Punkte  $A_0$ - ${}_1A$ - ${}_1B$ - $B_0$  in der Lage 1 bestimmt.

Diese im **Bild 3** dargestellte Lösung des 3-Lagen-Problems wird so auch einem CAD-Konstrukteur ohne spezielle Kenntnisse der Getriebetechnik ermöglicht. [3]



**Bild 3: Getriebe zur Lösung einer Führungsaufgabe durch drei Lagen**

Für die Erzeugung der homologen Lagen bzw. der Punkte zu den vorgegebenen Lagen 1 – 3 werden die Beziehungen im Skizziermodus verwendet. Die Abmessungen des Körpers ändern sich in den Lagen 1 - 3 nicht. Die homologen Lagen der Punkte A und B werden durch ihre jeweils identische Lage auf der jeweiligen Ebene festgelegt.

Pro/Engineer bietet bezüglich der Beweglichkeit der Punkte kaum Einschränkungen und es ist unerheblich, an welcher Lage die Punkte A und B angefasst und verschoben werden.

Durch die Festlegung der beiden Gelenkpunkte A und B kann der Konstrukteur Lösungsgetriebe erzeugen, die sich stark unterscheiden.

### 3 Getriebesynthese für vier Lagen einer Koppellebene mit Hilfe der BURMESTER'schen Kurven

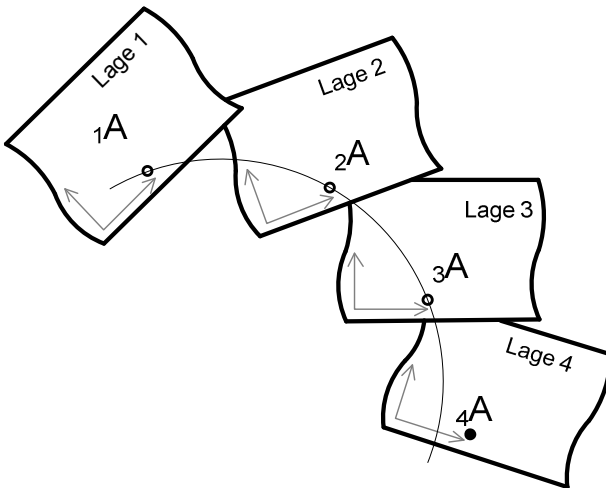
Bietet die Konstruktion für 3 vorgegebene Lagen noch unendlich viele Möglichkeiten für die Wahl der Punkte A und B in den drei Lagen, so können sich diese Punkte bei 4 vorgegebenen Lagen nur noch auf der sogenannten BURMESTER'schen Kreispunktkurve befinden. Die Gestellpunkte  $A_0$  und  $B_0$  können nur noch auf der BURMESTER'schen Mittelpunktkurve liegen.

Das Beispiel in **Bild 5** zeigt, auf welche Weise in einem CAD-System die BURMESTER'sche Kreispunktkurve und Mittelpunktkurve erzeugt und ein

Viergelenkgetriebe ausgewählt werden können. Die BURMESTER'schen Kurven werden hier nicht nach den in der Literatur bekannten Verfahren [7] konstruiert oder berechnet. Stattdessen wird ein systematisches, aber intuitiv-interaktives Vorgehen angewendet, um einen in Durchmesser und Lage veränderlichen Kreis durch drei Punkte mit einem vierten Punkt zur Deckung zu bringen.

Grundlage zur Bestimmung der BURMESTER'schen Kurven sind vier gegebene Lagen einer Ebene. Der Aufbau des CAD-Modells beginnt wieder mit der freien Wahl eines Kreispunktes, hier des Gelenkpunkts  ${}_1A$ . Für die zugeordneten restlichen drei homologen Lagen dieses Punktes in **Bild 4** gelten die gleichen Bedingungen wie bei dem 3-Lagen-Problem.

Der Gelenkpunkt A kann in einer Ebenenlage frei verschoben werden. Seine homologen Lagen in den anderen Ebenenlagen ändern sich analog.

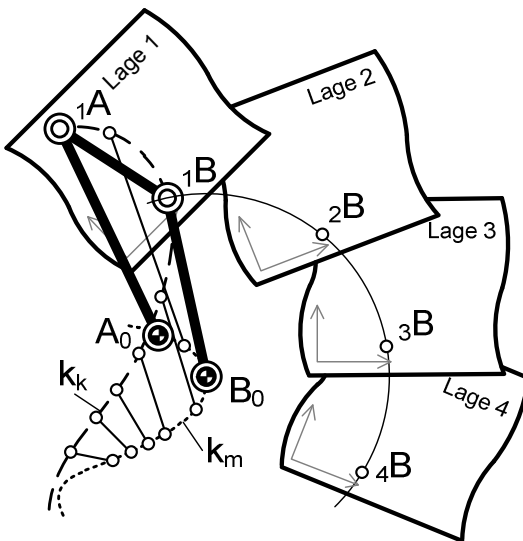


**Bild 4: Vier homologe Punktlagen auf den gegebenen Ebenenlagen**

Es ist das Ziel, die Punkte  ${}_1A$  bis  ${}_4A$  so zu positionieren, dass sie alle vier auf einem Kreis liegen. Dazu wird zunächst ein Kreis durch drei Punkte, siehe **Bild 4**, definiert. Der verbliebene vierte Punkt wird interaktiv verschoben. Durch Ziehen dieses Punktes ändern sich Lage und Durchmesser des Kreises durch die anderen drei Punkte. Durch geschicktes Verschieben des

vierten Punktes lässt er sich auf dem „beweglichen“ Kreis ablegen. Damit liegen alle vier Punkte auf einem Kreis, siehe Punkt B in den Lagen 1 - 4 in **Bild 5**. Die vier Lagen der Gelenkpunkte A und B sind Punkte der vier Kreispunktkurven. Die Mittelpunkte  $A_0$  und  $B_0$  sind Punkte der Mittelpunktkurve. Wird der Vorgang wiederholt, können die in **Bild 5** dargestellten BURMESTER'schen Mittel- und Kreispunktkurven in einer frei wählbaren Genauigkeit ermittelt werden. Einander zugeordnete Kreis- und Mittelpunkte werden dann durch Lenker verbunden, von denen zwei ausgewählt werden, um das Getriebe endgültig festzulegen.

Wenn es durch die obige Manipulation gelungen ist, den vierten Punkt in die Nähe des Kreises zu bringen, bietet Pro/Engineer eine weitere Möglichkeit, die das Vorgehen erheblich vereinfacht: Man kann die Forderung festlegen, dass dieser vierte Punkt immer auf dem Kreis liegen muss. Wird das System nun an einem beliebigen Punkt angefasst und bewegt, dann werden die letzten Freiheiten des Systems genutzt und die Kreispunkte wandern auf den BURMESTER'schen Kreispunktkurven, während der Mittelpunkt auf der Mittelpunktkurve wandert.



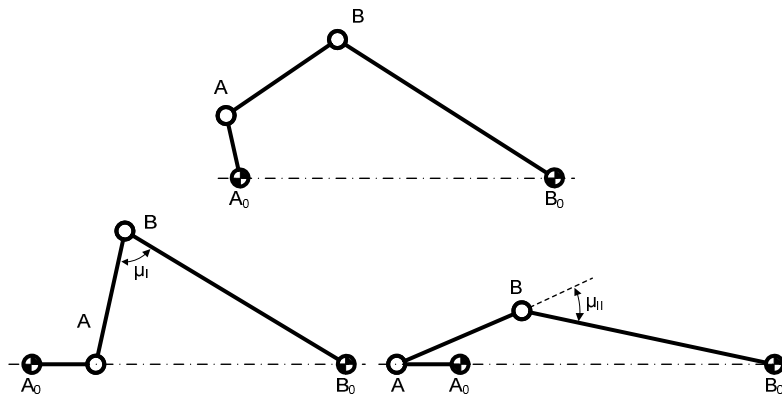
**Bild 5: Getriebeplanung für vier homologe Ebenenlagen**





Für die Wahl eines geeigneten Getriebes bietet die VDI 2130 verschiedene Gütekriterien. Getriebe können beschleunigungsgünstig oder übertragungsgünstig ausgelegt werden. Durch Ablesen aus verschiedenen Diagrammen wird dazu der Konstruktionswinkel  $\beta$  bestimmt. Durch die Wahl des Konstruktionswinkels sind die Punkte  $A_a$  auf dem Kreis  $k_A$  und  $B_a$  auf dem Kreis  $k_B$  festgelegt.

Dabei kann die übertragungsgünstigste Kurbelschwinge nicht gleichzeitig auch die beschleunigungsgünstigste sein. In diesem Beitrag wird nur das Gütekriterium „übertragungsgünstiges Getriebe“ betrachtet.



**Bild 7: Steglagen eines Getriebes**

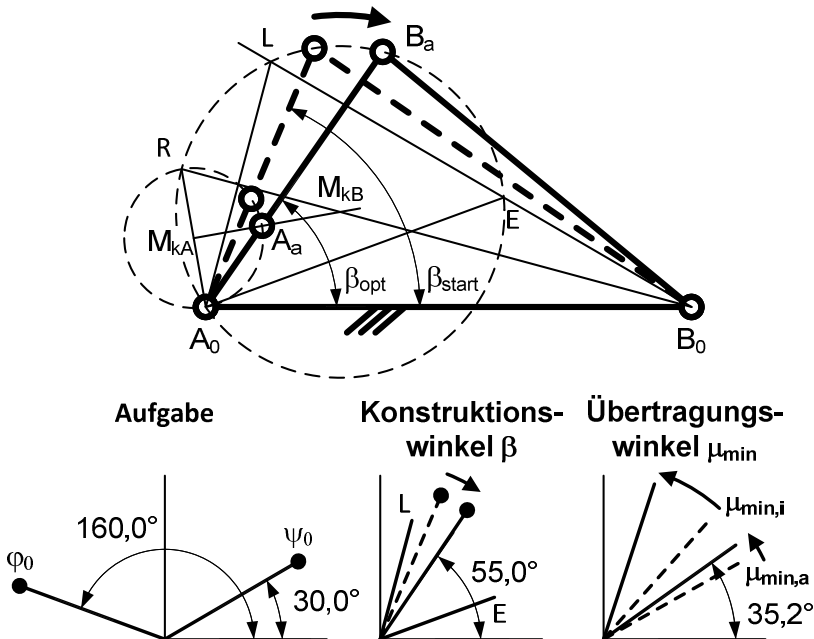
In **Bild 7** ist oben ein 4-gliedriges Getriebe in einer beliebigen Lage dargestellt. Unten in **Bild 7** sind die beiden Steglagen dargestellt, in denen die beiden kleinsten Übertragungswinkel während eines Umlaufs der Kurbel auftreten.

Die Konstruktion ist über Beziehungen zwischen den einzelnen Konstruktionselementen so aufgebaut, dass sich bei Änderungen an einer Stelle die restlichen Getriebeabmessungen direkt anpassen. Änderbar sind die Aufgabenparameter An- bzw. Abtriebswinkel  $\varphi_0$  bzw.  $\psi_0$  und als Wahlparameter der Konstruktionswinkel  $\beta$ . Diese veränderbaren Maße sind durch die ausgefüllten „Anfasspunkte“ in den Diagrammen in **Bild 8** zu erkennen.

Über die Skizze unten links in Bild 8 wird die Aufgabe durch  $\varphi_0$  und  $\psi_0$  festgelegt. Dazu werden die beiden „Anfasspunkte“ so gedreht, dass die

Winkel  $\varphi_0$  und  $\psi_0$  der Aufgabe entsprechen. Ebenso können über die Parametersteuerung auch konkrete Werte eingegeben werden. Nach Festlegung der Aufgabe lässt sich über die untere mittlere Skizze in **Bild 8** der Konstruktionswinkel  $\beta$  zwischen L und E variieren.

In der letzten Skizze unten rechts in **Bild 8** kann man dabei simultan die Auswirkungen auf die Getriebequalität beobachten. Hier liegt das assoziative Element. Es zeigt die Güte des gewählten Getriebes, die in diesem Fall durch die Übertragungswinkel in den beiden Steglagen, siehe **Bild 7**, beschrieben wird und dient dem Konstrukteur somit als Kompass. Bei Bedarf kann dieser die Übertragungswinkel aber auch unabhängig voneinander berücksichtigen und bewerten. [3]

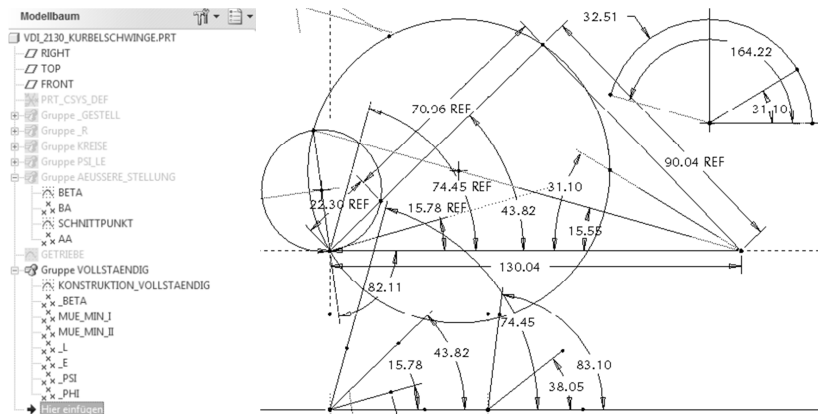


**Bild 8: CAD-basierte Konstruktion übertragungsgünstiger Kurbelschwingen**

Der Konstruktionswinkel  $\beta$  wurde hier von einem beliebigen Startwert  $\beta_{\text{start}}$  so lange variiert, bis bei einem Konstruktionswinkel  $\beta_{\text{opt}}$  der Minimalwert des kleineren Übertragungswinkels möglichst groß ist.

Eine Alternative zu dieser Ermittlung des Gütekriteriums ist die Getriebeanalyse. Auch diese kann mit geringfügig tieferen Pro/E-Kenntnissen mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, wie Berger 2010 in [4] gezeigt hat.

In **Bild 9** ist der Skizziermodus von Pro/Engineer Wildfire 5.0 dargestellt, in dem die Konstruktion einer Kurbelschwinge (Übertragungsgetriebe) nach der Konstruktionsvorschrift der VDI-Richtlinie 2130 parametrisch aufgebaut wurde. Vergleiche hierzu auch **Bild 8**. Rechts in **Bild 9** ist ein Ausschnitt der Skizzierumgebung zu sehen, links der zugehörige Modellbaum. Als Modellbaum wird hier die Anzeige der Gliederung der erzeugten Teile, Skizzen, Parameter etc. bezeichnet. Der Modellbaum stellt somit u.a. die Entstehungsgeschichte eines Bauteils anschaulich dar. Im Modellbaum können zur Erhöhung der Übersichtlichkeit des Aufbaus des CAD-Modells die einzelnen Konstruktionselemente individuell gruppiert und benannt werden. [1]

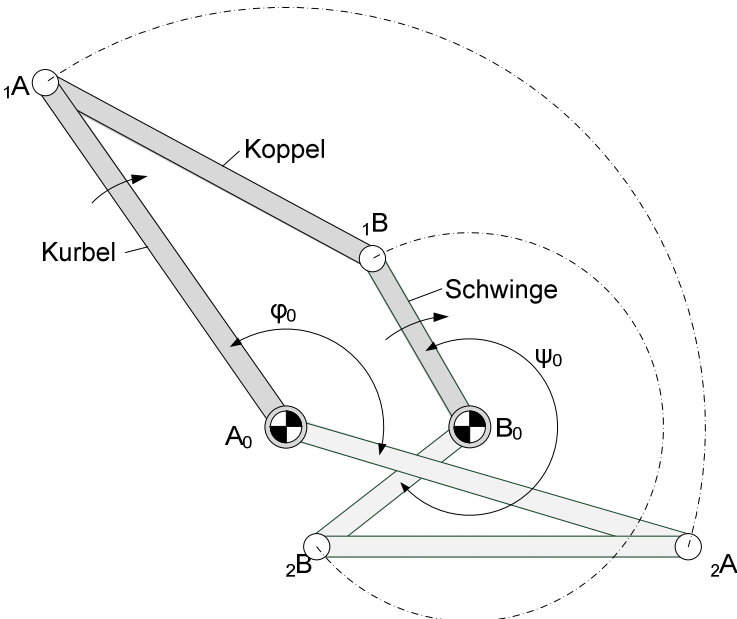


**Bild 9: Arbeitsumgebung in Pro/Engineer am Beispiel der VDI-Richtlinie 2130**

## 5 Getriebesynthese für die Umwandlung einer Drehbewegung in eine andere Drehbewegung mit einer 2-parametrischen Optimierung

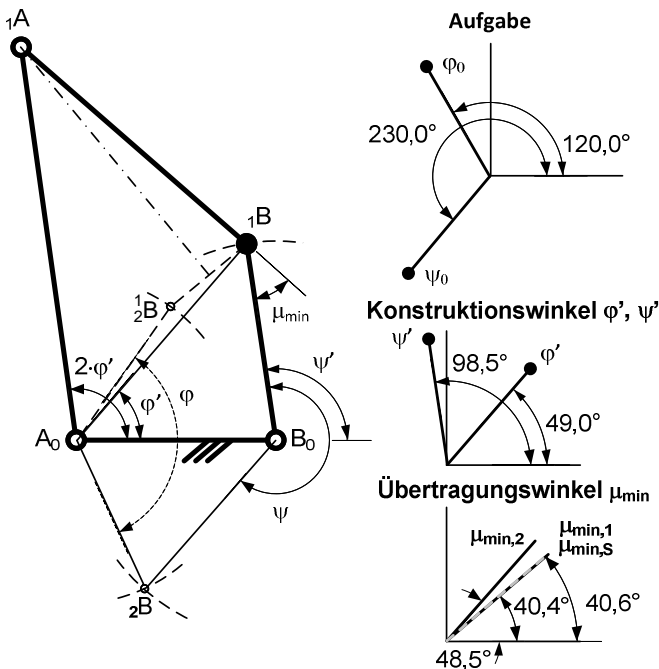
Die ALT'sche Totlagenkonstruktion ließ nur die Variation eines einzigen Parameters zu, des Konstruktionswinkels  $\beta$ . Aber auch in der Mechanismen-Synthese gilt, dass die mehrparametrischen Optimierungen anspruchsvoller und ergiebiger sind. Wenn ein „Kompass“ realisiert werden kann, dann sind 2-parametrische Optimierungen mit ebenen Bewegungen, z. Bsp. mit Mausebewegungen noch gut zu handhaben. Am Beispiel der Konstruktion nach VDI-Richtlinie 2123 [6] soll das demonstriert werden.

Die Aufgabe besteht darin, einen vorgegebenen Drehwinkel  $\varphi_0$  am Antriebsglied (Kurbel) in einen gewünschten - i.a. größeren - Drehwinkel  $\psi_0$  am Abtriebsglied (Schwinge) zu übertragen, wie in **Bild 10** dargestellt.



**Bild 10: Umwandlung einer Dreh- in eine Drehbewegung nach VDI 2123**

Durch Ablesen aus einem Diagramm der VDI-Richtlinie 2123 werden für eine gegebene Aufgabe ( $\varphi_0$  und  $\psi_0$  in **Bild 11** oben rechts) die Wahlparameter (Konstruktionswinkel  $\varphi'$  und  $\psi'$ ) festgelegt. Daraus ergibt sich der Punkt  ${}_1B$  als Schnittpunkt der freien Schenkel. Über die allgemeine Relativlagensynthese wird der Punkt  ${}_2B$  konstruiert. Der Punkt  ${}_1A$  des gesuchten übertragungsgünstigsten Getriebes ergibt sich als Schnittpunkt des freien Schenkels des Winkels  $2\varphi'$  mit der Mittelsenkrechten auf  ${}_1B$  und  ${}_2B$ . In der CAD-basierten Synthese kommt dem Konstrukteur zugute, dass gleichzeitig beide Wahlparameter  $\varphi'$  und  $\psi'$  manipuliert werden können (Verschieben des Punktes  ${}_1B$ ). In der Skizze Mitte rechts kann die Manipulation auch einzeln und nacheinander ausgeführt werden.



**Bild 11: CAD-basierte Konstruktion übertragungsgünstiger Getriebe nach VDI-Richtlinie 2123**

Als Navigationshilfe wird auch hier das Gütekriterium des Getriebes unten rechts im **Bild 11** angezeigt. Hier wurden die drei potentiell kritischen Übertragungswinkel  $\mu_{\min,1}$ ,  $\mu_{\min,2}$  und  $\mu_{\min,S}$  im geforderten Bewegungsbereich (Anfangs-, End- und Steglage) gewählt. Im Falle dieser 2-parametrischen Optimierung wird die Stärke der assoziativen dynamisch-interaktiven Arbeitsweise besonders deutlich. Ideal wird sie, wenn man wie hier als Kompass die Güte der Lösung synchron verfolgen kann. In diesem Beispiel gilt für das übertragungsgünstigste Getriebe systembedingt  $\mu_{\min,1} = \mu_{\min,S}$ . Natürlich erlaubt diese Vorgehensweise auch eine getrennte Beobachtung und Beurteilung der drei Übertragungswinkel. [3]

## 6 Resümee

Durch die Implementierung von Konstruktionsvorschriften in das 3D-CAD System Pro/Engineer Wildfire kann der Konstrukteur den Auslegungsprozess von Getrieben entschieden vereinfachen. Dazu ist nur geringes getriebetechnisches Grundwissen erforderlich und es kann für die hier gezeigten einfachen Übertragungs- und Führungsaufgaben auf teure Spezialsoftware verzichtet werden.

Das dynamische Verhalten des CAD-Systems eignet sich ideal für die Mechanismen-Synthese. Durch die Anwendung der grafischen Lösungsverfahren im CAD-System ergeben sich Vorteile, die die Urheber der Verfahren nicht erahnt haben. Die grafischen Verfahren bekommen eine ganz neue, größere Bedeutung, weil jetzt mit CAD-Systemen dynamisch interaktiv variiert werden kann, iterativ schnell Varianten geprüft werden, genügende Genauigkeit verfügbar ist, Bauraumanalysen und Kollisionsüberprüfungen simuliert werden und in der gleichen Welt die Detailkonstruktion fortgesetzt wird.

Perfekt wird diese dynamisch interaktive Arbeitsweise aber erst durch die assoziative Komponente, weil sie dem Entwickler zeigt, in welcher Suchrichtung bessere Getriebe zu erwarten sind. Eine weitere positive Erfahrung ist, dass die CAD-Modelle mit Standard-CAD-Kenntnissen angelegt werden können und keine spezielle Programmierung erforderlich ist.

## 7 Literatur

- [1] Clement, S.; Kittel K.: Pro/Engineer Wildfire 5.0 für Fortgeschrittene – kurz und bündig, 2., aktualisierte Aufl.: Vieweg+Teubner Verlag. Wiesbaden 2011

- 
- [2] Vogel, M.; Ebel, T.: Pro-Engineer und Pro-Mechanica. Konstruieren und berechnen mit Wildfire 4, 5., aktualisierte Aufl.: Hanser. München [u.a.] 2009.
  - [3] Scherer, T; Ahl, C; Helsper, H; Lohr, W.; Lohe, R.: Einsatzmöglichkeiten der 3D-CAD Systeme Catia V5 und Pro/Engineer Wildfire in der Getriebetechnik; 9. Kolloquium Getriebetechnik Tagungsband; Universitätsverlag Chemnitz; Chemnitz 2011
  - [4] Berger, M.; Matthes, J.: Implementierung und Anwendung klassischer Syntheseverfahren zur Entwicklung neuer Antriebssysteme im Umfeld von CAO und MKS; VDI Bewegungstechnik 2010 Tagungsband; VDI Verlag GmbH; Düsseldorf 2010
  - [5] VDI Richtlinie 2130: Getriebe für Hub- und Schwingbewegungen - Konstruktion und Berechnung viergliedriger ebener Gelenkgetriebe für gegebene Totlagen: Beuth Verlag. Berlin 1984.
  - [6] VDI Richtlinie 2123: Ebene Kurbeltriebe - Konstruktion übertragungsgünstiger viergliedriger Gelenkgetriebe für gleichläufige Schwingbewegung: Beuth Verlag. Berlin 2008.
  - [7] Burmester, L.: Lehrbuch der Kinematik für Studierende der Maschinentechnik, Mathematik und Physik geometrisch dargestellt / von L. Burmester: Erster Band. Die ebene Bewegung: Verlag Arthur Felix. Leipzig 1888